Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 1, с. 59–68
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 1, pp. 59–68



УДК 62-50 10.23947/1992-5980-2018-18-1-59-68

К автономному управлению техническим состоянием станков[*]

А. К. Тугенгольд [1], Р. Н. Волошин[2], М. Ю. Соломыкин[3]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

To autonomous control of technical state of machine tools [***]

A. K. Tugengold[1], R. N.Voloshin[2], M. Y. Solomykin[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В настоящее время внимание разработчиков и исследователей сфокусировано на автоматизированном поддержании работоспособности технологических машин, особенно в условиях компьютеризации производства. Существенно расширены возможности оценки технического состояния оборудования, диагностики и мониторинга неисправностей. Это позволяет предотвращать отказы и минимизировать влияние неблагоприятных факторов на производительность. С этой целью создается некоторая автономная система управления, концептуальным проблемам которой посвящена данная статья.

Материалы и методы. Рассмотрена система автономного управления техническим состоянием станка. Показано, что сигналы с датчиков и на исполнительные механизмы поступают через распределенные узлы управления техническим состоянием устройств станка. При этом необходимая связь обеспечивается возможностями *e-MindMachine*. К обобщенным функциям управления техническим состоянием металлорежущих станков отнесено принятие решений и исполнение команд с использованием встроенных средств. Описана и разъяснена специфика в построении системы технического обслуживания станков. В итоге обосновано следующее утверждение: при анализе процессов в станках и синтеза решений для управления поддержанием работоспособности станка (ПРС) адекватны методы искусственного интеллекта и интеллектуального управления (в том числе теории нечетких множеств и нечеткой логики).

Результаты исследования. Предлагаемый подход позволяет оценить достижения, представленные в известных системах технического обслуживания машин, и повысить уровень обслуживания до самостоятельно работающих систем автоматизированного автономного управления техническим состоянием. Рассмотрена структура системы, к обобщенным функциям управления которой отнесены принятие решений и исполнение команд с использованием встроенных средств. Показано, как при синтезе решений для управления используются методы теории нечетких множеств и нечеткой логики. Рекомендованы поэтапная разработка и внедрение автономной системы в зави-

Introduction. At present, developers and researchers focus on the automated maintenance of the machine performance, especially under the conditions of the production computerization. The opportunities for assessing technical state of the equipment, fault diagnostics and monitoring are greatly expanded. This allows preventing failures and minimizing the impact of disadvantages on the performance. For this purpose, some autonomous control system is developed. Its conceptual problems are discussed in this paper.

Materials and Methods. The autonomous control system of the machine technical state is considered. It is shown that signals from the sensors and to the actuating mechanisms arrive through the distributed control nodes of the technical state of the machine devices. Therewith, proper communication is provided by *e-MindMachine*. Generalized functions for managing the technical state of metal cutting machines include the decision making and command execution involving built-in facilities. The specificities in the construction of the machine maintenance system are described and explained. As a result, the following statement is established: when analyzing processes in the machine tools and in the solution synthesis for controlling the machine maintenance (MM), methods of artificial intelligence and intellectual control (including the theory of fuzzy sets and fuzzy logic) are adequate.

Research Results. This approach accumulates the achievements presented in the known maintenance systems of various machines, and it raises the service factor up to the independently operating systems of the automated autonomous control of the machine technical state. The system structure, the generalized control functions of which include the decision making and command execution using the built-in means, is considered. It is shown how methods of the theory of fuzzy sets and fuzzy logic are used in the solution synthesis for control. The incremental development and implementation of the autonomous system depending on the condition and capa-

[*]Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**]E-mail: akt0@yandex.ru, r.voloshin2909@gmail.com, oblivion_rk@mail.ru
[***]The research is done within the frame of the independent R&D.

симости от условий и возможностей предприятия.
Обсуждение и заключения. Рассмотрены вопросы внедрения системы автономного управления ПРС. Предложены адекватные методики определения последовательности работ и оценки эффективности. В подсистеме мониторинга предусмотрено, во-первых, выполнение традиционной диагностики в процессе наблюдении за состоянием станка в режиме онлайн. Во-вторых, для управления действиями, предотвращающими нарушения работоспособности устройства (или станка в целом), предполагается выполнение следующих функций: оценки результатов диагностики, прогнозирования и выработки решений.

bility of an enterprise are recommended.
Discussion and Conclusions. The issues on introducing the autonomous MM control system are considered. Appropriate methods for determining the sequencing of operations and evaluation of the performance are offered. The monitoring subsystem provides, firstly, the implementation of the traditional diagnostics under monitoring the machine state on-line. Secondly, it is supposed to perform the following functions: evaluation of the diagnostic results, and forecasting and decision making – in order to control the actions preventing damage to the device (or the machine as a whole).

Ключевые слова: автономное управление, гибкие производственные системы, мониторинг, экспертная система управления состоянием станка.

Keywords: autonomous control, flexible production systems, monitoring, expert system for controlling machine state.

Образец для цитирования: Тугенгольд, А. К. К автономному управлению техническим состоянием станков / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, М. Ю. Соломыкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С. 59−68.

For citation: A.K. Tugengold, R.N.Voloshin, M.Y. Solomykin. To autonomous control of technical state of machine tools. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 59−68.

Введение. Известны различные формы и методы технического обслуживания [1–3]. Всем им свойственны сильные и слабые стороны, в различной степени влияющие на уровень обеспечения надежности состояния машин и оборудования. Исследованию в области технического обслуживания посвящены многочисленные научные работы, например [4–15]. Перспективным направлением исследований считается разработка автоматизированных систем мониторинга и диагностики состояния узлов. На основе методов искусственного интеллекта создаются средства, получившие обобщенное название «системы электронного обслуживания» (*e-Maintenance*).

Система электронного обслуживания представляет собой набор программных и электронных компонентов поддержки технического обслуживания — интегрированных и (или) удаленных. Они позволяют:
— получать информацию о состоянии оборудования в режиме реального времени;
— прогнозировать развитие состояния узлов;
— оповещать персонал об аварийных и иных опасных состояниях оборудования;
— дорабатывать или корректировать управляющие программы во время работы оборудования.

Современные методы совершенствования технического обслуживания сводятся к созданию программ и методик проведения сервисного ремонта. Разработаны и используются такие системы, как *Enigma*, *CASIP*, *ICASAME*, *Remote Data Sentinel*, *InterMOR*, *INID*, *IPDSS*, *WSDF*, *MRPOS*, *Proteus*, *Telma*. [16–20]. В [21] такие системы классифицированы следующим образом:
— собственные платформы (например, *ICAS*);
— платформы, разработанные в рамках проектов (*Proteus*);
— платформы для исследований и обучения персонала (*Telma*).

Остаются актуальными вопросы создания модулей, которые позволят в условиях неопределенности принимать обоснованные решения по таким вопросам, как:
— методы и способы обслуживания металлорежущих станков,
— методики диагностики,
— анализ технологического состояния станков (текущего и прогнозируемого).

Подобное обслуживание позволяет создать некоторую автономную систему управления, концептуальным проблемам которой посвящена данная статья.

Материалы и методы. Проблемы управления техническим состоянием станков. Автономное управление. На предприятиях различных отраслей промышленности в последние десятилетия произошли кардинальные изменения в методах, средствах, технологиях анализа и мониторинга состояния технологического оборудования. Большинство неисправностей теперь может быть обнаружено на ранних стадиях. При этом возможно минимизировать их влияние на производительность и работоспособность в целом, не допуская отказов, простоев и значительных финансовых потерь.

С этой целью создаются микропроцессорные системы автоматического мониторинга, диагностики и управления информацией о состоянии оборудования, внедряются системы оценки технического состояния,

обнаружения и диагностики неисправностей. Особое значение придается сложному и дорогостоящему технологическому оборудованию — металлорежущим станкам.

Коротко остановимся на толковании используемых терминов «Автономное техническое обслуживание», *Autonomous maintenance* (*AM*), и «Автономное управление техническим обслуживанием», *Autonomous control of maintenance* (*ACM*) [22–23], применительно к станкам. Во-первых, под *AM* можно понимать автоматическое выполнение технологических функций станком при выполнении работ по ПРС (поддержание работоспособного состояния) оператором. Автономность обеспечивается на некоторый период, когда можно обходиться без привлечения других внешних трудозатрат для восстановительных работ, замены комплектующих и пр. Во-вторых, и это очень важно, в современном станкостроении целесообразно выполнение части функций техобслуживания самим станком (самообслуживание).

Система *ACM* предназначена для управления восстановлением и (или) ПРС. При этом происходит возможное самообслуживание устройствами станка: оператор получает указания для выполнения действий по обслуживанию и проверяет их эффективность. Автономность в управлении обслуживанием станков для ПРС достижима с учетом возможности применения трудозатрат оператора по командам *ACM*. А автономность *AM* станка в выполнении полного комплекса действий по восстановлению (в том числе замены комплектующих для обеспечения и поддержки работоспособности) может рассматриваться только как перспективная цель технического обслуживания (ТО).

Автономное управление техническим состоянием станков — это самостоятельный автоматизированный процесс. Такое управление целенаправленно воздействует на компоненты (устройства) станка для поддержания или восстановления его работоспособности. При этом используются специальные средства оценки состояния оборудования, его роли и связи с другими устройствами системы. Кроме того, автономное управление сообщает о состоянии оборудования посредством специальных сигналов.

Итак, главные задачи автономного управления техническим состоянием (АУТС) станка — это его способность «заботиться о себе», обеспечивать открытость системы АУТС, информационную связность с внешними службами.

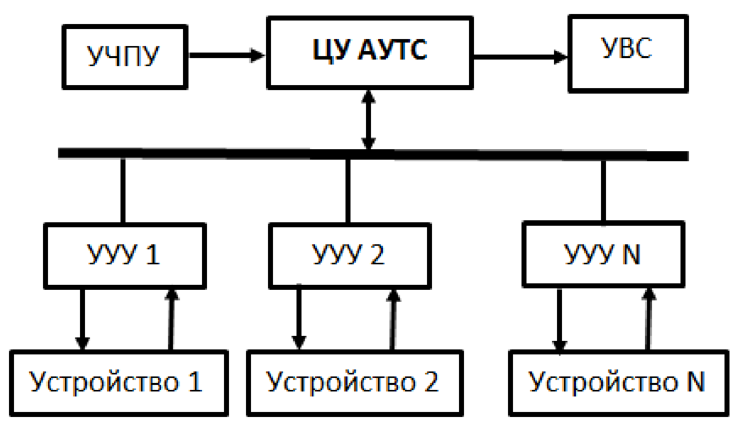


Рис. 1. Структура системы АУТС станка: ЦУ АУТС — центральный узел автономного управления техническим состоянием устройств станка; УВС — управление внешними службами; УУУ — узел управления устройством станка

Fig. 1. Structure of machine technical state control (MTSC) system: ЦУ АУТС –central node of autonomous control of technical state of machine tools; УВС – management of external services; УУУ – machine control unit

В представленной структуре системы АУТС сигналы с датчиков и на исполнительные механизмы поступают через распределенные узлы управления техническим состоянием устройств станка. Эти узлы связанны с центральным узлом автономного управления (ЦУ АУТС). Здесь сигналы о состоянии обрабатываются, оцениваются и принимаются решения о целесообразных действиях по поддержанию работоспособности. Кроме того, данный узел выполняет функции сигнализации, визуализирует состояние устройств, мониторит изменения состояний, анализирует критичность, архивирует данные, обеспечивает связи с устройствами числового программного управления (УЧПУ) и внешними службами. АУТС станка через УВС информационно связана с внешними службами обслуживания, ремонта оборудования и управляющими структурами. Такая связь обеспечивается возможностями *e-MindMachine* [24].

В предлагаемом подходе к обобщенным функциям управления техническим состоянием (ТС) металлорежущих станков отнесено принятие решений и исполнение команд с использованием перечисленных ниже встроенных средств.

— Сигнализация о предупреждении близости отказов станка (системы, подсистемы, узла, элемента). Далее в соответствующем случае будет использоваться слово «устройство». В области техники устройство — это техническое сооружение (прибор, механизм, конструкция, установка) со сложной внутренней структурой, созданный для выполнения определенных функций.

— Сигнализация о наступлении отказов устройства, аварийности состояния, частично неработоспособных состояний — для принятия мер по восстановлению.

— Сообщения о критичности ТС устройства.

— Сообщения о повреждении устройства, о деградации состояния.

— Сообщения о наступлении гамма-процентного ресурса (нечеткой границы работоспособности устройства).

— Сообщения о необходимости тех или иных действий предупредительного ТО по результатам встроенного контроля и оценки состояний устройства.

К функциям управления также отнесены принятие решений по восстановлению работоспособности устройства и координация соответствующих действий. Целесообразно, чтобы система АУТС обладала возможностями совершенствования методов автоматизированного обслуживания, выявления и устранения неисправностей устройств и станка в целом**.**

Специфика в построении системы ТО станков объясняется следующими факторами:
— сложность структуры станочной системы, включающей механические, электрические, электронные, гидравлические и другие подсистемы и устройства;
— разностороннее влияние состояния устройств на качество выполнения технологических функций станка при обработке деталей (прежде всего на точность и производительность);
— многообразие материалов заготовок и их свойств, технологических параметров, специфичных для каждого перехода техпроцесса (в их числе: параметры и качество инструмента; требуемые качественные характеристики поверхностей получаемых деталей; динамические факторы процессов обработки);
— разнообразие требований к ТС устройств для станков различных типов (класса точности, комплекса выполняемых функций, серийности производства и пр.).

Таким образом, можно обоснованно говорить о сложности (или даже невозможности) адекватного представления процессов изменений в ТС станков и отображения состояний аналитическими методами.

Адекватной методологией анализа процессов в станках и синтеза решений для управления ПРС представляются методы искусственного интеллекта и интеллектуального управления, в том числе теории нечетких множеств и нечеткой логики Л. Заде.

Результаты исследования. Нечеткое причинностное отношение предпосылок и заключений по процедуре управления состоянием представим в виде

$$R^* = A \rightarrow B,$$

где A и B — наблюдаемое и целевое (желательное) состояния устройства.

Процесс получения результата нечеткого вывода по управлению Y с использованием наблюдаемых данных X о техническом состоянии и знаний $A \rightarrow B$ представим в виде:

$$Y = X \times R^* = X \times (A \rightarrow B).$$

В общем случае управление состоянием устройства в представлениях нечетких множеств имеет вид:

$$Y = R\ (X).$$

Здесь $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_n\}$ — множество наблюдаемых данных входных переменных состояний станка; $Y = \{Y_1, Y_2, \ldots, Y_m\}$ — множество векторов параметров управления, соответствующих совокупности регулируемых параметров в устройствах станка для автоматического поддержания работоспособности, а также команд для выполнения действий оператором; R — нечеткий оператор преобразований в системе управления состоянием.

На основе методов, реализуемых в концепции *Mind Machine*, управление по изменениям состояний с учетом наследуемых и оперативных параметров производится для каждого *i*-го устройства по гамма-процентному ресурсу надежной работы (для случаев наличия статистических данных) или по оценке пограничной полосы [25–27] (для остальных случаев).

Множество входных переменных X_i для *i*-го устройства можно представить в виде

$$X_i = \{X_{iн}, X_{io}\},$$

где $X_{iн}$ — множество наследуемых параметров *i*-го устройства, соответствующих его состоянию к моменту синтеза решений по управлению; X_{io} — множество оперативных данных состояний устройства по онлайн-наблюдениям в процессе работы станка.

Множество Y_j параметров управления *j*-м устройством определяется совокупностью регулируемых параметров и корректирующих характеристик для восстановления его работоспособного состояния. Так, для приводов подач рабочих органов, например, характерны воздействия, направленные на устранение или компенсацию внутришаговой и накопленной ошибок датчиков перемещений, динамической, моментной и скоростной ошибок двигателей приводов, зазоров, погрешностей в паре «винт — гайка» [28].

При разработках системы АУТС может предусматриваться некоторая последовательность или стадийность *P* в зависимости от складывающихся на предприятии условий и реализованных возможностей:

$$P = S1 \rightarrow S2 \rightarrow \ldots \rightarrow ST.$$

Здесь *S1* — сигнализация предупреждений (сигналов или сообщений) о появлении отклонений от нормального режима работы устройств, требующих исправления ситуации оператором и (или) обслуживающим персоналом; *S2* — сигнализация предупреждений о появлении неисправности в устройствах; *S3* — диагностика состояний устройств; *S4* — мониторинг состояний устройств; *S5* — автономность управления ТС устройства; *ST* — автономность управления ТС станка в целом.

В совокупности проблем и задач построения систем автономного управления техническим состоянием станков по стадиям наиболее значимая — *S4* (мониторинг ТС при автономном управлении ТС).

Эффективность мониторинга при автономном управлении состоянием. Одна из основных составляющих системы автономного управления ПРС — интеллектуальный мониторинг работы станка. При построении систем мониторинга наряду с традиционными процедурами диагностики в процессе наблюдения за состоянием станка в режиме онлайн предусматриваются функции оценки результатов диагностики, функции прогнозирования и выработки решений для управления действиями, предотвращающими нарушения работоспособности и (или) ее восстановления.

В опубликованных ранее работах [25–27, 29] достаточно внимания уделялось вопросам формирования системы мониторинга станков при построении концепции *e-MindMachine.* Одним из частных примеров является система мониторинга фирмы *FANUC — RODOCUTLINKi* [30]. Это современный инструмент для сбора и анализа в реальном времени информации о работе станка и качестве получаемых изделий. Система обеспечивает доступ к функциям планового предупредительного обслуживания, а также к расходным материалам и ремонтным службам.

Мы остановимся на ранжировании этих систем по приоритетности. Среди стандартов, в которых представлены сведения по диагностике и мониторингу технического состояния машин любого типа, — ГОСТ Р ИСО 13379-2009, ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015, ГОСТ ИСО 13381-1-2016 [23, 31, 32]. В них отражены вопросы эффективности диагностирования и мониторинга. В данной статье использованы следующие рекомендованные ГОСТ показатели ранжирования (со специфической коррекцией, учитывающей особенности данного подхода):

DET — по обнаружению нарушений работоспособности и качества функционирования станка;

SEV — по оценке критичности состояний (нарушения основных технологических функций, ущерба и опасности);

DGN — по доверительному уровню диагностики;

PGN — по доверительному уровню прогноза.

Эти величины отражают суммарное влияние источников различных неопределенностей на степень уверенности в точности оценки.

Обобщенная оценка показателя значимости или эффективности мониторинга *EFM* (*effectiveness of monitoring*) может быть получена на основании экспертных знаний и выводов.

Для оценки значимости мониторинга ТС станка предложена нейронечеткая модель, реализованная в среде *MATLAB* (рис. 2).

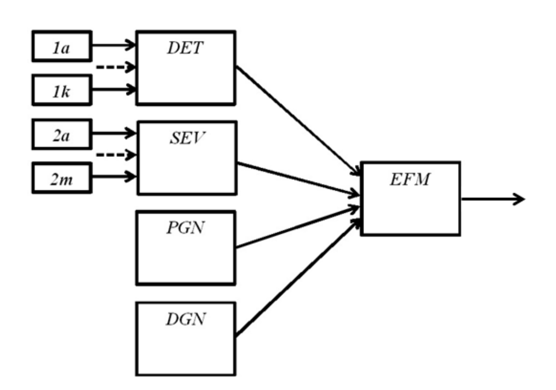


Рис. 2. Нейронечеткая система значимости мониторинга

Fig. 2. Neural fuzzy system of monitoring significance

Показатели *DET* и *SEV* (т. е. способность обнаружения нарушений и оценка критичности состояний) оцениваются нечеткими методами с использованием пакета *Fuzzy Logic Toolbox* и алгоритма *Mamdani* по следующей совокупности входных данных.

Показатель *DET* (с учетом оценки уровней):

1*a* — по сигнализации (только при наступлении отказа);

1*b* — по сигнализации для предупреждения об отклонении от нормального режима работы;

1*c* — по системе диагностики состояния;

1*k* — по системе мониторинга состояния.

Показатель *SEV* критичности нарушений работоспособности:

2*a* — функциональная значимость нарушения;

2*b* — стоимостная оценка восстановления;

2*c* — стоимостная оценка ущерба от брака и простоя;

2*d* — частота нарушений работоспособности и отказов;

2*m* — эффективность средств предупреждения о критичности состояния.

Оценки *DET* и *SEV* получаем в результате дефаззификации.

Входные данные показателей *DGN* и *PGN* представляются непосредственно в термах *L*, *M* и *B* по экспертным оценкам с учетом многообразия факторов, представленных в ISO 13381-1:2004 [33] (рис. 3).

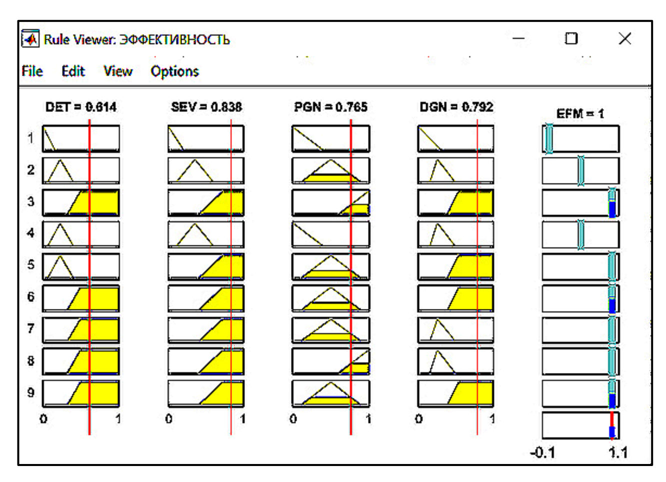


Рис. 3. Эффективность мониторинга в системе АУТС

Fig. 3. Monitoring efficiency in system of autonomous control of technical state of machine tools

Обобщенная оценка эффективности *EFM* системы мониторинга проводится нейронечеткой системой *ANFIS* (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*) в среде *MATLAB* с пакетом *Fuzzy Logic Toolboxи* алгоритмом *Sugeno*. Категории относительной оценки — от *L* (низкая) до *B* (высокая) (рис. 3). Оценка выполнена на примере станка модели *HAAS Super Mini Mill*, оснащенного средствами мониторинга.

Обсуждение и заключения. Представлен концептуальный подход к построению системы автономного управления техническим состоянием металлорежущих станков. Особенности описанной концепции:

— создание целостной автономной системы управления техническим состоянием, самостоятельно действующей в планируемый период работы;
— ориентация на специфические особенности станков по сравнению с другими технологическими машинами.

Предложено определение понятия «автономное управление техническим состоянием станков». Показана структура системы АУТС станка с распределенными узлами управления состоянием устройств, учитывающая специфику и принципы построения интеллектуального модуля управления *e-Mind Machine*. При этом центральный узел управления выполняет функции, связанные с мониторингом изменения состояний:
— сигнализация,
— визуализация,
— анализ критичности,
— архивация,
— связи с УЧПУ и внешними службами.

Для эффективного функционирования АУТС предусмотрена система мониторинга, которая не только выполняет традиционные процедуры диагностики в процессе наблюдения за состоянием станка в режиме онлайн, но и:
— оценивает результаты диагностики,
— прогнозирует состояния,
— вырабатывает решения для предотвращения нарушений работоспособности устройства или станка в целом.

Библиографический список

1. Мальцев, А. И. Мониторинг технического состояния крупных машин / А. И. Мальцев, А. А. Мальцев. — Электросталь : ДАМО, 1998. — 62 с.

2. ГОСТ Р ИСО 17359-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство по организации контроля состояния и диагностирования / Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва : Стандартинформ, 2010. — 20 с.

3. Никитин, Ю. Р. О построении системы диагностирования станков с ЧПУ / Ю. Р. Никитин, И. В. Абрамов // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2011. — № 4. — С. 32–35.

4. Muller, A. Proactive maintenance for industrial system operation based on a formalised prognosis process / A. Muller, M.-C. Suhner, B. Iung // Reliability Engineering and System Safety. — 2006. — Vol. 93. — P. 234–253.

5. Intelligent prognostics tools and e-maintenance / J. Lee [et al.] // Computers in Industry. — 2006. — Vol. 57. — P. 476–489.

6. Djurdjanovic, D. Watchdog Agent — an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction / D. Djurdjanovic, J. Lee, J. Ni // Advanced Engineering Informatics. — 2003. — № 17 (3). — P. 109–125.

7. Moore, W.-J. An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities / W.-J. Moore, A.-G. Starr // Computers in Industry. — 2006. — Vol. 57. — P. 595–606.

8. Круглова, Т. Н. Диагностирование и прогнозирование технического состояния мехатронных модулей движения технологического оборудования / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. — Новочеркасск : ЮРГТУ, 2011. — 120 с.

9. E-Maintenance update: the road to success for modern industry / C. Emmanouilidis [et al.] // Proceedings of the 24th International Congress on condition monitoring and diagnostic engineering management, 2011. – Birmingham : COMADEM International, 2011. — 423 p.

10. Wang, P. Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks / P. Wang, G. Vachtsevanos // Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. — 2001. — Vol. 15. — P. 349–365.

11. Zhang, W. An agent-based platform for service integration in E-maintenance / W. Zhang, W. Halang, C. Diedrich // Proceedings of ICIT 2003, IEEE international conference on industrial technology. — Piscataway Township : IEEE, 2003. — Vol. 1. — P. 426–33.

12. Lee, J. E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation / J. Lee // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2003. — № 19 (6). — P. 501–507.

13. MIMOSA — four years later / J. Mitchell [et al.] // The Journal of Sound and Vibration. — 1998. — Vol. 11. — P. 12–21.

14. Prognostics and health management design for rotary machinery systems — Reviews, methodology and applications / J. Lee [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2014. — Vol. 42. — P. 314–334.

15. Xiangang Cao. Development of SOA Based Equipments Maintenance Decision Support System / Xiangang Cao, Pingyu Jiang // ICIRA: International Conference on Intelligent Robotics and Applications. — Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. — Part II, vol. 5315. — P. 576–582.

16. Rissland, E.-L. Combining case-based and rule-based reasoning: A heuristic approach / E.-L. Rissland, D. B. Skala // IJCAI-89 : Proceedings of the 11th international joint conference on Artificial intelligence. — San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989. — Vol. 1. — P. 524–530.

17. Erl, T. Service-oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design / T. Erl. — New Jersey : Prentice Hall, 2005. — 764 p.

18. PROTEUS — An integration platform for distributed maintenance systems / T. Bangemann [et al.] // Computers in Industry : Special issue on e-maintenance. — 2006. — № 57 (6). — P. 539–551.

19. Thurston, M. Standards Developments for Condition-Based Maintenance Systems / M. Thurston, M. Lebold // New Frontiers in Integrated Diagnostics and Prognostics : Proceedings of the 55th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. — Virginia Beach : Defense Technical Information Center, 2001. — P. 363–373.

20. A component based system for S-maintenance / M.-H. Karray [et al.] // 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'11. — Caparica ; Lisbon : HAL, 2011. — P. 1–8.

21. Muller, A. On the concept of e-maintenance: Review and current research / A. Muller, C. Marquez, B. Iung // Journal of Reliability Engineering and System Safety. — 2008. — Vol. 93. — P. 1165–1187.

22. Соловьева, Н. Инструмент для соблюдения сроков / Н. Соловьева // Силовые машины. — 2013. — № 14. — С. 4.

23. ГОСТ Р ИСО 13379-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Руководство по интерпретации данных и методам диагностирования / Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем ; Технический комитет по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удар и контроль технического состояния»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2010. — 27 с.

24. Тугенгольд, А. К. Модуль E-Mindmachine в интеллектуальной системе мониторинга станка / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, С. В. Ющенко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2015. — № 9 (40), ч. 2. — С. 100–102.

25. Monitoring and Control of Tools in Multifunctional Machine Tools / A. K. Tugengold [et al.] // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, № 5. — P. 440–446.

26. Тугенгольд, А. К. Гибкий мониторинг мехатронных технологических машин / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 4. — С. 51–58.

27. Monitoring of Machine Tools / A. K. Tugengold [et al.] // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, № 8. — P. 440–446.

28. Пуш, В. Э. Автоматические станочные системы / В. Э. Пуш, Р. Пигерт, В. Л. Сосонкин. — Москва : Машиностроение, 1982. — 319 с.

29. Структура и алгоритм работы системы диагностики состояния многооперационного станка [Электронный ресурс] / А. В. Ядченко [и др.] // Современные научные исследования и разработки. — 2017. — № 8 (8). — С. 230–237. — Режим доступа : http://olimpiks.ru/d/1340546/d/vypusk_88.pdf.

30. Аппаратное и программное обеспечение для станка ROBOCUT FANUC [Электронный ресурс] / FANUC. — Режим доступа: http://www.fanuc.eu/ru/ru/robocut-ib/опции-для-станков-robocut (дата обращения 10.10.17).

31. ГОСТ Р ИСО 13379-1-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 1. Общее руководство / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2016. — 33 с.

32. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016. Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство / Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем ; Технический комитет по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удар и контроль технического состояния»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2017. — 20 с.

33. ISO 13381-1:2004 Condition monitoring and diagnostics of machines. Prognostics. General guidelines [Электронный ресурс] / British Standards Institution. — Режим доступа: https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030152751 (дата обращения: 26.02.18).

References

1. Maltsev, A.I., Maltsev, A.A. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya krupnykh mashin. [Monitoring of technical condition of large machines.] Elektrostal: DAMO, 1998, 62 p. (in Russian).

2. GOST R ISO 17359-2009. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Obshchee rukovodstvo po organizatsii kontrolya sostoyaniya i diagnostirovaniya. [GOST R ISO 17359-2009. Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidelines on condition monitoring and diagnostics procedures.] Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ISC). Moscow: Standartinform, 2010, 20 p. (in Russian).

3. Nikitin, Yu.R., Abramov, I.V. O postroenii sistemy diagnostirovaniya stankov s ChPU. [Disigning of CNC ma-

chines, diagnosing system.] Mechatronics, Automation, Control, 2011, no. 4, pp. 32–35 (in Russian).

4. Muller, A., Suhner, M.-C., Iung, B. Proactive maintenance for industrial system operation based on a formalised prognosis process. Reliability Engineering and System Safety, 2006, vol. 93, pp. 234–253.

5. Lee, J., et al. Intelligent prognostics tools and e-maintenance. Computers in Industry, 2006, vol. 57, pp. 476–489.

6. Djurdjanovic, D., Lee, J., Ni, J. Watchdog Agent — an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. Advanced Engineering Informatics, 2003, no. 17 (3), pp. 109–125.

7. Moore, W.-J., Starr, A.-G. An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities. Computers in Industry, 2006, vol. 57, pp. 595–606.

8. Kruglova, T.N., Glebov, N.A. Diagnostirovanie i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya mekhatronnykh moduley dvizheniya tekhnologicheskogo oborudovaniya. [Diagnosis and prediction of technical condition of mechatronic modules of process equipment movement.] Novocherkassk: YuRGTU, 2011, 120 p. (in Russian).

9. Emmanouilidis, C., et al. E-Maintenance update: the road to success for modern industry. Proceedings of the 24th International Congress on condition monitoring and diagnostic engineering management, 2011. Birmingham: COMADEM International, 2011, 423 p.

10. Wang, P. Vachtsevanos, G. Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2001, vol. 15, pp. 349–365.

11. Zhang, W., Halang, W., Diedrich, C. An agent-based platform for service integration in E-maintenance. Proceedings of ICIT 2003, IEEE international conference on industrial technology. Piscataway Township: IEEE, 2003, vol. 1, pp. 426–33.

12. Lee, J. E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2003, no. 19 (6), pp. 501–507.

13. Mitchell, J., et al. MIMOSA — four years later. The Journal of Sound and Vibration, 1998, vol. 11, pp. 12–21.

14. Lee, J., et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems — Reviews, methodology and applications. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, vol. 42, pp. 314–334.

15. Xiangang Cao, Pingyu Jiang. Development of SOA Based Equipments Maintenance Decision Support System. ICIRA: International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. Part II, vol. 5315, pp. 576–582.

16. Rissland, E.-L., Skala, D.-B. Combining case-based and rule-based reasoning: A heuristic approach. IJCAI-89: Proceedings of the 11th international joint conference on Artificial intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989, vol. 1, pp. 524–530.

17. Erl, T. Service-oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 764 p.

18. Bangemann, T., et al. PROTEUS — An integration platform for distributed maintenance systems. Computers in Industry: Special issue on e-maintenance, 2006, no. 57 (6), pp. 539–551.

19. Thurston, M., Lebold, M. Standards Developments for Condition-Based Maintenance Systems. New Frontiers in Integrated Diagnostics and Prognostics: Proceedings of the 55th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. Virginia Beach: Defense Technical Information Center, 2001, pp. 363–373.

20. Karray, M.-H., et al. A component based system for S-maintenance. 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'11. Caparica; Lisbon: HAL, 2011, pp. 1–8.

21. Muller, A., Marquez, C., Iung, B. On the concept of e-maintenance: Review and current research. Journal of Reliability Engineering and System Safety, 2008, vol. 93, pp. 1165–1187.

22. Solovyeva, N. Instrument dlya soblyudeniya srokov. [Instrument for meeting deadlines.] Silovye mashiny, 2013, no. 14, pp. 4 (in Russian).

23. GOST R ISO 13379-2009. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Rukovodstvo po interpretatsii dannykh i metodam diagnostirovaniya. [GOST R ISO 13379-2009. Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques.] Research and Test Centre for Technical Systems Control and Diagnostics; Technical Committee for Standardization TK 183 "Vibration, shock and condition monitoring"; Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2010, 27 p. (in Russian).

24. Tugengold, A.K., Voloshin, R.N., Yuschenko, S.V. Modul' E-Mindmachine v intellektual'noy sisteme monitoringa stanka. [Module e-mind machine in the intellectual monitoring system of the machine.] International Research Journal, 2015, no. 9 (40), part 2, pp. 100–102 (in Russian).

25. Tugengold, A.K., et al. Monitoring and Control of Tools in Multifunctional Machine Tools. Russian Engineering Research, 2017, vol. 37, no. 5, pp. 440–446.

26. Tugengold, A.K., Voloshin, R.N. Gibkiy monitoring mekhatronnykh tekhnologicheskikh mashin.[Flexible monitoring of mechatronic technological machines.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 4, pp. 51–58 (in Russian).

27. Tugengold, A.K., et al. Monitoring of Machine Tools. Russian Engineering Research, 2017, vol. 37, no. 8, pp. 440–446.

28. Push, V.E., Pigert, R., Sosonkin, V.L. Avtomaticheskie stanochnye sistemy. [Automatic machine tool systems.] Moscow: Mashinostroenie, 1982, 319 p. (in Russian).

29. Yadchenko, A.V., et al. Struktura i algoritm raboty sistemy diagnostiki sostoyaniya mnogooperatsionnogo stanka. [The structure and algorithm of the diagnostic system status multioperational machine.] Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki, 2017, no. 8 (8), pp. 230–237. Available at: http://olimpiks.ru/d/1340546/d/vypusk_88.pdf. (in Russian).

30. Apparatnoe i programmnoe obespechenie dlya stanka ROBOCUT FANUC. [Hardware and software for ROBOCUT FANUC machine.] FANUC. Available at: http://www.fanuc.eu/ru/ru/robocut-ib/опции-для-станков-robocut (accessed: 10.10.17) (in Russian).

31. GOST R ISO 13379-1-2015. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Metody interpretatsii dannykh i diagnostirovaniya. Chast' 1. Obshchee rukovodstvo. [GOST R ISO 13379-1-2015. Condition monitoring and diagnostics of machines. Data interpretation and diagnostics techniques. Part 1. General guidelines.] Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2016, 33 p. (in Russian).

32. GOST R ISO 13381-1-2016. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya. Chast' 1. Obshchee rukovodstvo. [GOST R ISO 13381-1-2016. Condition monitoring and diagnostics of machines. Machine condition prognosis. Part 1. General guidelines.] Research and Test Centre for Technical Systems Control and Diagnostics; Technical Committee for Standardization TK 183 “Vibration, shock and condition monitoring”; Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2017, 20 p. (in Russian).

33. ISO 13381-1:2004 Condition monitoring and diagnostics of machines. Prognostics. General guidelines. British Standards Institution. Available at: https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030152751 (accessed: 26.02.18).

Поступила в редакцию 10.01.2018
Сдана в редакцию 12.01.2018
Запланирована в номер 02.02.2018

Received 10.01.2018
Submitted 12.01.2018
Scheduled in the issue 02.02.2018

Об авторах:

Тугенгольд Андрей Кириллович,
профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0551-1486
akt0@yandex.ru

Волошин Роман Николаевич,
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907
r.voloshin2909@gmail.com

Соломыкин Михаил Юрьевич,
магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5216-9938
oblivion_rk@mail.ru

Authors:

Tugengold, Andrey K.,
professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0551-1486
akt0@yandex.ru

Voloshin, Roman N.,
postgraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907
r.voloshin2909@gmail.com

Solomykin, Mikhail Y.,
undergraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5216-9938
oblivion_rk@mail.ru